

(26) 滑りを拘束したプレキャスト・プレストレスト
コンクリート耐震壁の破壊性状と強度評価

工学院大学大学院	○鳥屋 隆志
工学院大学工学部	正会員 望月 洵
ドービー建設工業(株)	正会員 倉持 春夫
O. R. S事務所	小野里憲一

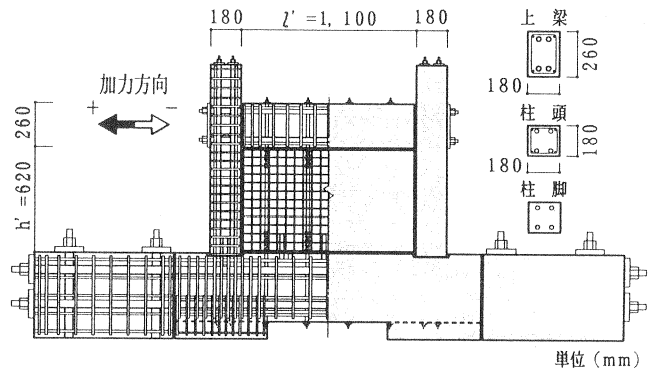
1. はじめに

高層プレストレストコンクリート柱・梁構造の保有耐力を確保するためには、プレキャストコンクリート耐震壁の導入は自然な要請であり、その強度と剛性的確な評価方法の確立が必須の課題である。筆者らは、さきにプレキャスト・プレストレストコンクリート柱・梁構造にプレキャストコンクリートパネルを組み込んだ耐震壁（以下、PCa・PC耐震壁という）を提案し[1]、基礎的な実験を行ってきた[2],[3]。その結果は、PCa・PC耐震壁が十分な構造性能をもつものであることを示している。また、これらの実験結果をもとに、RC耐震壁の強度評価のためのマクロモデルをPCa・PC耐震壁に適用できるように修正して強度評価を試み[3],[4]、工学的に妥当な結果を得た。しかし、PCa・PC耐震壁の最大強度が側柱下端の滑りによって限界づけられ、耐震壁の変形性状も著しく影響をうけるものであった。この側柱の滑りは、最大強度の確保および強度と変形的確な評価には、好ましくないといえる。

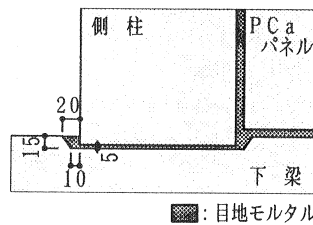
本研究は、側柱下端をだぼの形で10mm根入れし、さらにPCaパネル下端の水平目地にホゾを設けることで滑りを拘束したPCa・PC耐震壁について水平加力実験を行い、その破壊性状と強度評価について述べたものである。

2. 実験計画

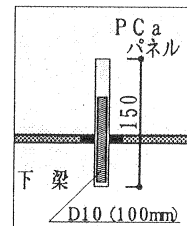
試験体と組立手順： 試験体は、連層耐震壁の基層をモデル化したもので、剛強な上梁と下梁、せん断破壊しないように補強された側柱とPCaパネルから構成されている。試験体は93PCWAと93PCWBの2シリーズからなり、93PCWAシリーズはPCaパネルの形状比が $h'/l' = 0.6$ 、93PCWBシリーズは $h'/l' = 1.4$ で、各シリーズでのパラメータは破壊モードである。図-1(a)に93PCWAシリーズの試験体の形状と寸法、および配筋詳細を示す。93PCWBシリーズの試験体は93PCWAシリーズと $l' \times h'$ のみが 80×110 cmと異なる。側柱と上梁、側柱と下梁はPC鋼棒によって圧着接合され、そのシーすはグラウトされる。PCaパネルは上梁と下梁を貫通するPC鋼棒によって圧着接合されるが、



(a) 形状寸法と配筋 (93PCWAシリーズ)



(b) 側柱下端の根入れ



(c) PCaパネルのホゾ

図-1 試験体

そのシー스는実験終了後の取替えのためグラウトされない。これは、激震の際に破損したPCaパネルを取り替え修復し、耐震壁としての再利用を意図しているためである。側柱は図-1(b)に示す10mmの根入れをもつ。また、PCaパネルにはその下端水平目地のみ図-1(c)に示すホゾがあり、そのシー스는グラウトされる。

表-1に試験体の諸性質と破壊モードの指標である圧縮ストラットの水平有効幅係数 ξ の値を示す。一体打ちRC耐震壁について、筆者らは破壊モードを次のように定義し、その予測は簡略モデルから求められる ξ の値から可能であるとしている[5]。PCa・PC耐震壁についても同じ定義と予測を用いる。

- 曲げ破壊モード : 引張側柱が引張降伏し、最大層間変形角が $R_b \geq 10 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ である。
 ξ の値は、 $\xi \leq 0.4$ である。
- 曲げ・せん断破壊モード : 引張側柱が引張降伏し、最大層間変形角が $R_b \geq 5 \sim 10 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ である。
 ξ の値は、 $0.4 < \xi < 0.8$ である。
- せん断破壊モード : 引張側柱は引張降伏せず、最大層間変形角が $R_b \approx 5 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ である。
 ξ の値は、 $\xi \geq 0.8$ である。

試験体は、施工の際の組立てと同じ次の手順で組み立てられた。

- 1) PCaフレームとPCaパネルを設置し、PC鋼棒で仮締めする。
- 2) 接合目地にモルタル(マスタ-フロー-870)を注入する(養生1日以上)。
- 3) 側柱と下梁、および上・下梁とPCaパネルを圧着接合する。
- 4) 側柱と上梁を圧着接合する。
- 5) 側柱および上梁のシー스에グラウトする(養生7日以上)。

加力と計測 : 加力はアクチュエータによる水平正負交番力を上梁位置に加え、その加力サイクルは最大荷重または層間変形角 $R=1.0 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ ごと2回、それ以降は $R=2.0 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ ごと1回である。計測は、上梁下端と下梁の相対水平変位、側柱下端の水平変位、および上、下水平目地位置における側柱とPCaパネルのPC鋼棒の歪について行っている。

表-1 試験体の諸性質

試験体名	PCaパネル			側柱				接合目地 σ_b	水平有効 幅係数 ξ	実験結果							
	ps	σ_b	ΣPi	pg		σ_y	σ_b			ΣPi	Qexp		Rb				
				柱頭	柱脚						+	-	+	-			
93PCWA-1	0.45	536	13.2	2.06	0.49	13780	564	13.2	594	0.4	46.3	48.3	8.5	12.8			
93PCWA-2							597		697	0.4	50.6	50.9	11.0	10.0			
93PCWA-3				PC鋼棒 4-D7.4	357	14.0	2.39	0.82	14340	541	25.2	685	0.6	57.1	57.6	10.2	10.4
93PCWA-4										569		665	0.6	55.0	52.0	14.6	12.3
93PCWA-5							2.74	1.17	13720	565	36.4	689	0.7	—	68.5	—	9.5
93PCWB-1	0.56	357	14.0	2.06	0.49	13780	550	14.0	606	0.3	27.1	28.7	20以上	19.0			
93PCWB-2							572		546	0.3	26.0	28.7	12.7	13.3			
93PCWB-3				PC鋼棒 4-D7.4	357	14.0	2.39	0.82	14340	475	25.6	699	0.5	33.5	34.9	16.3	12.8
93PCWB-4										462		506	0.5	35.1	36.5	13.3	12.8
93PCWB-5							2.74	1.17	13720	464	36.8	467	0.7	42.4	43.4	8.6	8.1

【PCWAシリーズ】 PCaパネルの内法寸法: $l' \times h' = 100(\text{cm}) \times 60(\text{cm})$ 反曲点高さ: $h' \cdot \gamma = 75(\text{cm})$
 【PCWBシリーズ】 $l' \times h' = 80(\text{cm}) \times 110(\text{cm})$ $h' \cdot \gamma = 125(\text{cm})$
 【共通】 側柱寸法 : $b \times D = 18(\text{cm}) \times 18(\text{cm})$ 側柱主筋 : 4-D13, $\sigma_y = 3518(\text{kgf/cm}^2)$
 壁厚 : $t_e = t - \phi = 4.5 - 1.0 = 3.5(\text{cm})$ 側柱帯筋 : D6@50, $\sigma_y = 3857(\text{kgf/cm}^2)$
 上梁 : $\Sigma Pi = 164.4(\text{tf}), 4 - \phi 17$ 壁筋 : D6@50, $\sigma_y = 3857(\text{kgf/cm}^2)$
 下梁 : $\Sigma Pi = 240.0(\text{tf}), 4 - \phi 32$
 【記号】 pg(%) : 側柱主筋比 $\sigma_b(\text{kgf/cm}^2)$: コンクリート圧縮強度
 ps(%) : PCaパネル壁筋比 $\sigma_y(\text{kgf/cm}^2)$: 鉄筋, PC鋼棒の降伏点強度
 Qexp(tf) : 実験の最大強度 $R_b(\times 10^{-3} \text{ rad.})$: $0.8 Q_{exp}$ と包絡線の交点に
 $\Sigma Pi(\text{tf})$: 部材の全圧着力 対する層間変形角

3. 実験結果

93PCWAシリーズ： 93PCWA-1,2は引張側柱が引張降伏に近い状態にあったが $R_b \approx 10 \times 10^{-3}$ rad. であるため曲げに近い曲げ・せん断破壊モードで、93PCWA-3,4は引張側柱が引張降伏していなかったが $5 < R_b \leq 10 \times 10^{-3}$ rad. であるためせん断に近い曲げ・せん断破壊モードで、また93PCWA-5は引張降伏していないことからせん断破壊モードで、それぞれ終わったと判定できた。これらは破壊モードの予測と多少のずれが認められるものの、大要、 δ による予測がPCa・PC耐震壁についても妥当といえる。破壊経過の典型的なものとして、曲げ・せん断破壊モードで終わった93PCWA-3について述べる。

93PCWA-3： 層間変形角 $R=1.0 \sim 2.0 \times 10^{-3}$ rad. で引張側柱下端に引張亀裂が、 $R=3.0 \times 10^{-3}$ rad. 以降でPCaパネルに斜め亀裂が生じた。その後、PCaパネル下水平目地に亀裂が生じ、PCaパネルに小さな滑りが生じた。また、 $R=3.0 \times 10^{-3}$ rad. で柱脚部に曲げ亀裂が、その後せん断亀裂、柱頭部に曲げ亀裂が生じた。最大荷重には $R=7.0 \times 10^{-3}$ rad. 前後で達し、 $R=10.0 \times 10^{-3}$ rad. 以降に強度低下を示したが、再び安定な平滑域を形成した。柱・梁フレームの曲げ変形とPCaパネルのせん断変形のくい違いによる接合目地の目開きは最大強度時近くで著しくなり、最終状態で鉛直目地近くのPCaパネルの破損が生じた。最大強度以降、圧縮側柱下端の水平変位が大きくなり、最大強度は側柱の滑り強度と根入れ部のモルタルの抵抗で限界づけられた。なお、引張側柱の引張降伏は生じていない。図-2にQ-R曲線、最終亀裂状況、および左側柱下端の水平変位を示す。Q-R曲線は紡錘型で、特に最大強度以降で残留変形が多い。これは、PCaパネルとフレームのがたと最大強度以降の滑りによるものと考えられる。側柱の根入れ深さとPCaパネルのホゾは滑りを拘束するには不十分といえる。これらの破壊性状は93PCWAシリーズの試験体に共通している。

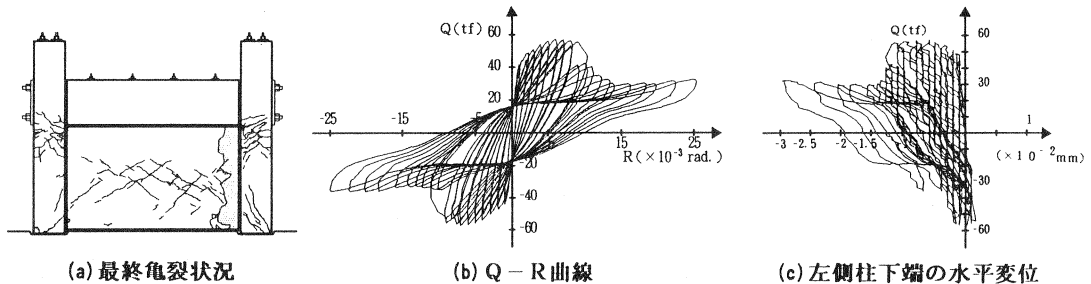


図-2 93PCWA-3

93PCWBシリーズ： 93PCWB-1,2は引張側柱の引張降伏が生じ、 R_b も大きく典型的な曲げ破壊モードで、93PCWB-3,4は引張側柱の引張降伏が生じていないが、 $5 < R < 10 \times 10^{-3}$ rad. のため曲げ・せん断破壊モードで、また93PCWB-5はせん断破壊モードで終わったと判定された。このシリーズの場合も破壊モードの予測は、大要、妥当といえる。ここでは、典型的な曲げ破壊モードで終わった93PCWB-2とせん断破壊モードで終わった93PCWB-5の破壊経過について述べる。

93PCWB-2： $R=1.0 \sim 2.0 \times 10^{-3}$ rad. で引張側柱下端に引張亀裂が、 $R=3.0 \sim 8.0 \times 10^{-3}$ rad. にかけてPCaパネルに斜め亀裂が多数生じた。PCaパネルの接合目地の亀裂は $R=2.0 \sim 4.0 \times 10^{-3}$ rad. にかけて生じたが目開きは顕著でなく、また滑りも明確ではなかった。最大強度には $R=3.0 \times 10^{-3}$ rad. 以降に達し、大きな平滑域を形成した。このとき、引張側柱は引張降伏している。側柱頭部の曲げ亀裂は $R=12.0 \times 10^{-3}$ rad. 以降に生じ、その後PCaパネル隅角部の破損が顕著になり、強度のゆるい低下がみられた。図-3にQ-R曲線、最終亀裂状況、および左側柱下端の水平変位を示す。Q-R曲線は残留変形が小さいS字型で、最大強度時で側柱下端の滑りが生じていないことを示している。

93PCWB-5： 破壊経過は、基本的には93PCWB-2と変わらないが、側柱に生じる曲げ亀裂は $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad.

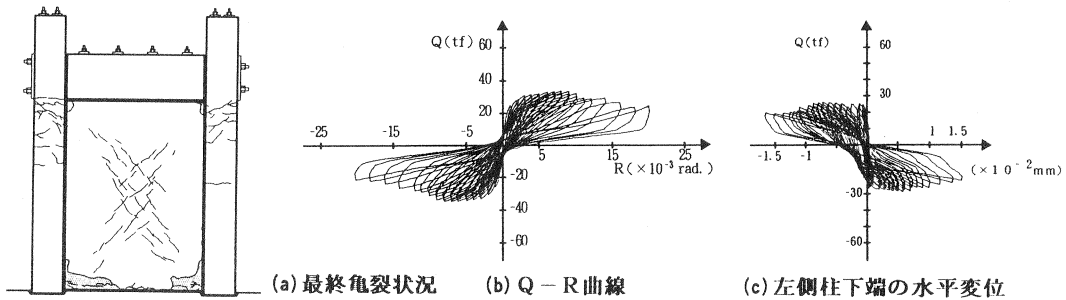


図-3 93PCWB-2

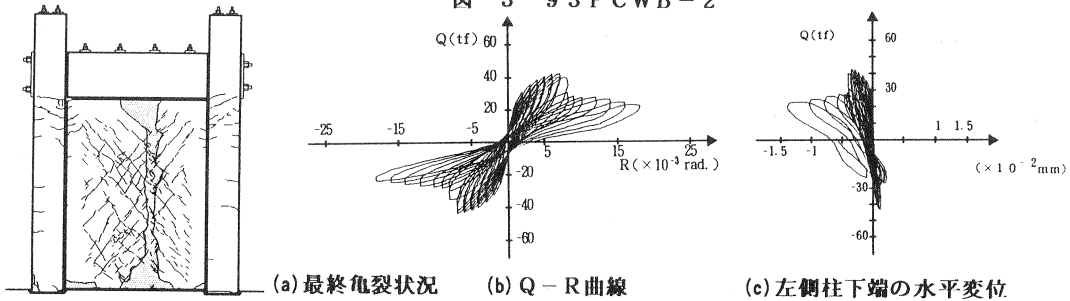


図-4 93PCWB-5

程度から生じた。また、引張側柱の引張降伏は生ぜず、PCaパネルの圧壊で最大強度が急激に低下する典型的なせん断破壊モードを示した。最終段階でPCaパネルのPC鋼棒に沿って著しい亀裂が生じたが、破壊性状を左右するものではなかった。図-4にQ-R曲線、最終亀裂状況、および左側柱下端の水平変位を示す。この試験体もまた側柱下端の滑りが生じなかった。93PCWBシリーズの場合、側柱の根入れ深さとPCaパネルのホブは滑りを拘束するには十分といえる。

以上の破壊経過から、PCa・PC耐震壁の最大強度時における抵抗のメカニズムは次のようにまとめられる。

圧縮ストラットが形成された後、引張側柱と圧縮ストラットによるアーチ作用と圧縮側柱のせん断力の和で抵抗する。このとき、圧縮ストラットに生じる力の鉛直接合目地に平行な成分と摩擦抵抗との差は剛強な上梁または下梁によって、また水平接合目地に平行な成分と摩擦抵抗との差は側柱によって抵抗されている。この結果、PCa・PC耐震壁の最大強度は側柱のせん断強度または圧縮ストラットの圧壊強度で限界づけられる。93PCWAシリーズの試験体は前者に相当し、93PCWBシリーズの試験体は後者に相当する。ここでいう側柱のせん断抵抗力は、本実験の試験体の場合、側柱下端の滑り強度と側柱が根入れによるだけ抵抗の和である。表-1に最大強度と最大層間変形角の実験値を示す。なお、試験体93PCWA-5はアクチュエータの引き能力を超えたため、片振れの交番加力で行った。

4. 最大強度のマクロモデルによる解析

ここでは、PCa・PC耐震壁の最大強度の解析を、筆者らのマクロモデルに側柱の根入れによるだけ抵抗を導入して行う。マクロモデルによる方法は、最大強度時に相応する適当な静的許容応力場を仮定し、多数の解のうちの最大値を最大強度とする極限解析の下界定理に基づいている。図-5にマクロモデルを示す。モデルは上・下梁、側柱、傾斜角 θ をもつ圧縮ストラット①、②、および縦引張補筋筋(PC鋼棒)より構成される。これらの構成部材は最大強度時において次の状態にあると仮定される。

- 1) 上・下梁は剛強で破壊しない。

- 2) 側柱は上・下端で降伏し、その中間部で降伏しているか弾性域にある。圧縮側柱下端の滑り強度 spQ_c は次の式で表される。

$$\left. \begin{aligned} spQ_c &= \mu \cdot \bar{N} + \lambda \cdot N_y / 2, \\ \text{ただし、} \bar{N} &= N_c + N_y / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

ここで、 N_c : 圧縮側柱下端の軸力
 N_y : 側柱下端のPC鋼棒の全降伏強度
 μ : 摩擦係数
 λ : PC鋼棒のホゾ効果を表す係数

- 3) 圧縮ストラット①は $0.63\sigma_B$ で降伏している。圧縮ストラット②は、交差する側柱の領域が引張降伏しているため除かれる。ここで、 σ_B はPCaパネルのコンクリートの圧縮強度である。圧縮ストラットの下端水平目地と圧縮側柱鉛直目地における滑り強度 spQ_{wh} と spQ_{wv} は、それぞれ次の式で表される。

$$\left. \begin{aligned} spQ_{wh} &= (\mu \cdot \sigma_{av} + \lambda \cdot \sigma_{sv}) \cdot t \cdot \xi h \cdot l \\ spQ_{wv} &= \mu \cdot \sigma_{ah} \cdot t \cdot \xi v \cdot h' \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

ここで、 $\sigma_{av} = 0.63\sigma_B \cdot \sin\theta \cdot \sin\theta$ 、 $\sigma_{ah} = 0.63\sigma_B \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta$ 、 σ_{sv} : PCaパネル接合筋の降伏強度の均し応力、および ξh と ξv はそれぞれ圧縮ストラットの下端水平目地と圧縮側柱鉛直目地に沿う有効幅係数である。

圧縮ストラット上端水平目地と引張側柱鉛直目地における滑り強度も、同様に式(2)で表される。ただし、 ξh と ξv は相当する目地に沿う有効幅係数である。圧縮ストラットの存在力と spQ_{wh} または spQ_{wv} との差 ΔQ_{wh} または ΔQ_{wv} は、それぞれ直接に圧縮側柱脚部または下梁に伝わる。

- 4) 縦引張補強筋はすべて降伏している。
 5) 圧縮側柱下端の根入れに基づくだば抵抗力 BRC は次の式で表される。

$$BRC = 0.85\sigma_B \cdot b \cdot h_B \dots\dots(3)$$

ここで、 σ_B は目地モルタルの圧縮強度、 b は側柱の幅、および h_B は根入れ深さである。

仮定 1)~4)は、さきにPCa・PC耐震壁について設定したマクロモデルの仮定と同じものである。仮定 5)は、図-3, 4, 5の(c)に示したように、側柱下端の水平変位が最大強度以降で歪に換算して0.1%~0.4%のオーダーに達し、ほぼ目地モルタルの圧壊歪に達したに基づいている。係数0.85は、側柱の回転に伴う応力勾配を考慮したものである。解析は、上に設定した仮定に基づく静的許容応力場について必要なつりあい式を立て、圧縮ストラットの傾斜角 θ を変数にした反復計算によって実行される。解析にあたって、式(1)、(2)に含まれる係数 μ 、 λ は、既往の試験体の実験値と解析値との比較から得られた $\mu = 0.6$ 、 $\lambda = 0.4$ を用いる[3]。実験が正負交番加力のため、式(1)の \bar{N} に含まれる第2項は省略される。また、式(2)の σ_{sv} はPCaパネルのホゾ筋の降伏強度を均した値である。縦引張補強筋のホゾ効果はシースにグラウトしていないため省略する。さらにPCaパネルの有効板厚 t_e としてシースの断面欠損部を除いた $t_e = t - \phi$ を用いる。ここで、 t : PCaパネルの板厚、 ϕ : シースの直径である。

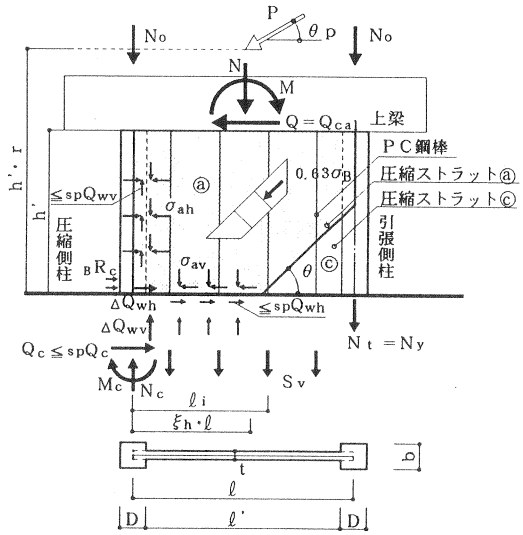


図-5 マクロモデル

表-2に解析結果を示す。図-6は最大強度の解析値と実験値の比較である。よく対応している。表の最大強度と圧縮側柱下端のせん断力 Q_c (解析値)、および滑り強度 spQ_c (解析値)の比較から、93PCWAシリーズの試験体は圧縮側柱下端が滑り強度に達し、一方、93PCWBシリーズの試験体は滑り強度に達していないことがわかる。図-7は、圧縮ストラットの解析による傾斜角と実験で観察されたPCaパネルの斜め亀裂の傾斜角の比較である。大要、よく対応している。以上の結果は、設定したマクロモデルがPCa・PC耐震壁の強度評価に対して妥当であることを示している。

表-2 解析結果

試験体名	Q_{exp} (tf)	Q_{cal} (tf)	$\frac{Q_{exp}}{Q_{cal}}$	θ_{cal} (deg.)	Q_c (tf)	spQ_c (tf)
93PCWA-1	+	46.3	1.03	35.5	27.8	27.8
	-	48.3	1.07			
93PCWA-2	+	50.6	1.09	34.8	30.0	30.0
	-	50.9	1.10			
93PCWA-3	+	57.1	0.94	41.8	34.0	34.0
	-	57.6	0.94			
93PCWA-4	+	55.0	0.90	41.8	33.7	33.7
	-	52.0	0.85			
93PCWA-5	+	—	—	47.5	33.8	33.8
	-	68.5	0.97			
93PCWB-1	+	27.1	0.94	42.5	25.8	37.5
	-	28.7	1.00			
93PCWB-2	+	26.0	0.90	42.5	25.9	36.6
	-	28.7	1.00			
93PCWB-3	+	33.5	0.90	53.5	21.3	39.9
	-	34.9	0.94			
93PCWB-4	+	35.1	0.95	53.8	20.9	36.8
	-	36.5	0.99			
93PCWB-5	+	42.4	1.05	54.3	21.2	39.6
	-	43.4	1.08			
平均値			0.98			
標準偏差			0.07			
変動係数			0.07			

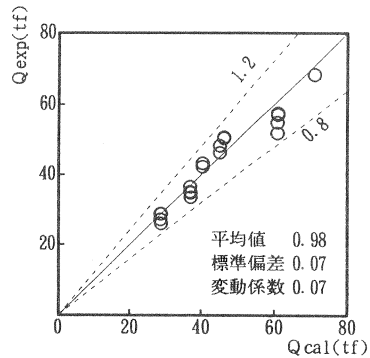


図-6 解析値と実験値の比較

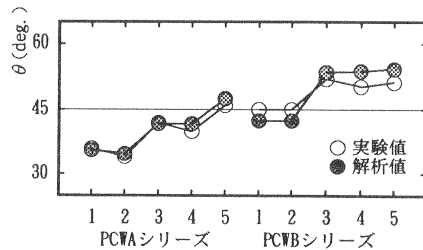


図-7 傾斜角の比較

5. 結び

本研究は、次のようにまとめられる。

- 1) PCa・PC耐震壁は十分な構造性能を示し、その破壊モードは水平有効幅係数 ξ の値から予測できる。
- 2) 側柱下端の根入れは滑りの拘束に効果的であるが、完全にするためには根入れ深さの検討が必要である。
- 3) 側柱下端の根入れに基づくだば抵抗を考慮したマクロモデルによる強度解析は、最大強度をよく評価できている。

参考文献

[1]八木沼宏己、望月洵、中村勝、倉持春夫:プレキャストプレストレスト耐震壁の最大強度式,第3回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集,PP.407~412,1992.11

[2]望月洵、小野里憲一、中村勝、倉持春夫:PC+PCa耐震壁に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.14, No.2, PP.843~848,1992.6

[3]望月洵、小野里憲一、中村勝、倉持春夫:プレキャスト・プレストレスト耐震壁の強度と変形,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.15, No.2, PP.1201~1206,1993.6

[4]望月洵、小野里憲一、中村勝、倉持春夫、八木沼宏己:プレキャストプレストレストコンクリート耐震壁の滑りを考慮した簡略化最大強度式,プレストレストコンクリート,Vol.35, No.4,1993.7

[5]望月洵、小野里憲一:連層耐震壁の破壊モードの判別式,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.13, No.2, PP.559~564,1991.6